

循環型社会に適応した生産システムに関する研究

有光大幸，中島健一，能勢豊一，栗山仙之助

工学研究科 経営工学専攻

〈2003年9月30日受理〉

A Study on Adapted Manufacturing Systems in the Recycling-based Society
by

Hiroyuki ARIMITSU, Kenichi NAKASHIMA,

Toyukazu NOSE and Sennosuke KURIYAMA

Major in Industrial Management, Engineering Studies

(Manuscript received September 30, 2003)

Abstract

This paper deals with adapted manufacturing systems in a recycling-based society. Industry has been mass-produced and consumed resources to optimize only economical efficiency. Most products are discarded or disposed at the end of their lifetimes. The disposal of used, outdated products is an important issue because waste sites are overflowing. Since the Industrial Revolution, product design and manufacturing techniques have not been considered for their effects on the environment, and as the number of products increased, so did the amount of industrial waste. In Japan, "The Basic Law for Establishing the Recycling-based Society" was enacted in 2000 and industries in Japan began adapting to the law. Many industry are addressing Environmental issues when designing and manufacturing products. We introduce extended inventory management and the control of the product lifetime to the system. Finally, we suggest a new approach to evaluating the remanufacturing system in which all the products currently in use are also considered as the virtual inventory.

1 緒 言

産業革命以来，経済活動は生産者主導で進められ，生産の効率化が求められてきた．そして，経済発展に伴い生産および消費が増大し，多くの製品は環境への配慮が足りないまま生産されていった．さらに，大量に消費された製品は，その製品寿命を終えると必然的に大量に廃棄されてきた．その結果，資源の枯渇や廃棄物の増大といった問題に直面している [30]．米国環境保護庁 (EPA; Environmental Protection Agency) によれば，1990 年アメリカで発生した廃棄物の量は，1960 年の 8,800 万トンから 1 億 9,600 万トンという莫大な量にまで膨れ上がっている [27]．さらに，天然資源（材料，エネルギー，水など）は何兆トンもの使用量となり，米国の研究者 Wann [34] によれば，平均的な米国人は，毎年 20 トンの資源を消費している．Hentschel [7] によれば，ドイツにおいて電化製品による廃棄物の量は，1990 年代初めには，毎年 80 万トン以上の量に達していると報告されている．

日本では，一般廃棄物が約 5,000 万トン，産業廃棄物が約 4 億 2,000 万トンとなっており，一般廃棄物，産業廃棄物ともに横ばいとなっている [10]．投棄，埋立て，燃焼のような古い処理方法では，もはや新しい環境法に対応できるものではなく，新しい方法の開発が期待されている．

このような問題を解決するため，従来の大量生産-大量消費-大量廃棄型の社会から，環境への負荷を重視した適正生産-適正消費-最少廃棄型の社会である循環型社会へと移行していかなければならない [10]．また，廃棄物の処理には，従来強調されてきた排出者の責任だけでなく，生産の上流部分の生産者にも責任があると考えられている．そこで，廃棄物の排出を抑制するために，廃棄される製品を回収して新規製品の生産に活用する循環型生産を実現させていくための新しい生産システムの確立が望まれている．このように，近年，ますます深刻さを増す環境問題を背景として，循環型社会形成に向け，従来の生産システムは，環境を考慮した製品の回収，再利用などの面においてその形態は再構築を迫られている．そのような循環型生産では，製品の概念デザインから生産，配送，さらには，製品寿命を終えた製品廃棄物の排出までを考慮して，新製品の設計・生産を行うことが必要である [36]．そこでは，製品寿命を終えた製品を積極的に回収・分解して再生産に用いることにより，環境の悪影響を極力抑えた生産形態が考えられている [33]．そのためには，製品設計の段階で分解しやすい製品を設計することが重要となる [14]．

日本において，2000 年に循環型社会形成推進基本法が制定され，リサイクル関連法が整備されてきている．このような循環型社会が，どのように形成されていくべきかについて，循環型社会形成推進基本法 [1] (2001 年施行) に定義されている．その循環型社会形成推進法 (2 条 1 項) によると，循環型社会は，

「製品等が廃棄物等となることが抑制され，並びに製品等が循環資源となった場合においてはこれについて適正に循環的な利用が行われることが促進され，及び循環的な利用が行われない循環資源については適正な処分が確保され，もって天然資源の消費を抑制し，環境への負荷ができる限り低減される社会」

と定められている．ここで，廃棄物等とは，廃棄物の処理及び清掃に関する法律にある廃棄物に加

えて、一度使用され、もしくは使用されずに回収され、もしくは廃棄された物品や、製品の製造、加工、修理又は販売、エネルギーの供給、土木建築に関する工事、農畜産物の生産、その他、人の活動に伴い副次的に得られた物品を含めたものをいう。さらに、これらの廃棄物等のうち有用なものを循環資源という。廃棄物等のうち不要なものは廃棄物となり、循環資源のうちでも、利用されないものや利用が終わったものは廃棄物となる [1]。そこで、循環資源の循環的な利用および処分について、順位付けが行われている [10]。その優先順位は、(1) 発生抑制 (Reduce)、(2) 再使用 (Reuse)、(3) 再生利用 (Material Recycling)、(4) 熱回収 (Thermal Recycling)、(5) 適正処分となっている。また、循環型社会には、排出者責任と拡大生産者責任の考え方が組み込まれており、消費者、生産者が共に取り組んでいかなければならないとしている。循環型社会推進のための法体系 [1] として、図 1 に示すような法体系をとっている。これらの法整備により、生産者や消費者の意識が変革され、循環型社会の形成に向かっていくと考えられている。

第 2 節では、循環型社会に向けた法整備として、循環型社会推進のための法体系を行政、消費者、生産者に分け解説している。つぎに、第 3 節では、循環型社会に向けた製造業の取組みとして実例を述べている。そして、第 4 節では、従来の在庫管理から循環型社会に対応した在庫管理への拡張について述べている。さらに、第 5 節では、これまでに行われている循環型生産システムに関する研究を紹介し、顧客が使用中の在庫を仮想在庫として扱う、循環型社会に適応した生産システムについて述べる。

2 循環型社会に向けた法整備

循環型社会推進のための法体系として、循環型社会形成推進基本法を始めとし、廃棄物処理法 (2001 年改正施行)、資源有効促進法 (2001 年施行)、容器包装リサイクル法 (2000 年施行)、家電リサイクル法 (2001 年施行)、食品リサイクル法 (2001 年施行)、建設リサイクル法 (2002 年施行)、自動車リサイクル法 (2004 年施行予定)、グリーン購入法 (2001 年施行) がある。これらの法律を行政、消費者、生産者の観点から見ていく [12]。

2.1 行政

循環型社会形成推進基本法では、大枠として循環型社会形成推進基本法に定められている廃棄物の抑制・適正処理といった基本原則にのっとり、循環型社会の形成に向けた基本的かつ総合的な施策を策定し、それを実施していかなければならないとしている。廃棄物処理法では、国内で生じた廃棄物を国内で適正に処理するとともに、廃棄物を適正に処理するための施設の整備と作業方法の改善を図り能率的な運営をしていかなければならないとしている。そして、資源有効利用促進法と容器包装リサイクル法などの各リサイクル法では、必要な資金の確保や再生品の利用を促進するよう教育活動や、広報活動を通じて、消費者等の理解を深めるために努力しなければならないとなっている。グリーン購入法では、物品調達において、環境を考慮した製品への需要の転換を促進するとある。

このように、行政は、循環型社会の形成に向けた施策を策定していき、それを消費者等に浸透さ

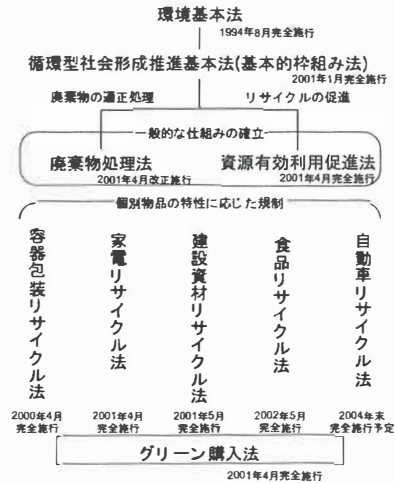


図1 循環型社会の形成に向けた法体系

せ、資金や設備等の確保を行っていくこととなる。そして、行政が率先して環境を考慮した製品購入を行っている。

2.2 消費者

消費者は、製品をなるべく長期間使用するとともに、再生品を使用すること、また製品が分別して回収されることに協力することなどにより、製品が廃棄物となることを抑制し、製品の適正な処理が行われることを促進するように行政の施策に対する協力を努めなければならないと循環型社会形成推進基本法に定められている。また、廃棄物処理法では、廃棄物の排出を抑制し、再生品の使用するなど廃棄物の再生利用に努める。さらに、廃棄物を分別して排出し、その生じた廃棄物をなるべく自ら処分することにより、その適正な処理に関して、行政の施策に対する協力を努めなければならないとある。そして、資源有効利用促進法では、製品を長期間使用し、再生された製品の利用に努めるとともに行政に対する協力を努めなければならないとある。また、各リサイクル法によると、発生の抑制と環境を考慮した製品の使用、そして分別回収または、再商品化や処理にかかる費用を支払わなければならない。グリーン購入法では、製品を購入するときに、環境を考慮した製品を選択するように努めなければならないとある。

このように、消費者は、行政が策定した施策に協力することにより、廃棄物の発生を抑制し、分別して排出することにより適正な処理に努める。そして、環境を考慮した製品を使用し、その製品を廃棄するときに処理に必要な費用を支払わなければならない。これは、製品を排出する消費者が責任を負う排出者責任の考え方である。しかし、製品を廃棄するときにかかる処理費用などを支払いたくない消費者などによる不法投棄などの問題もある。また、中古買取業者に製品を買い取ってもらう消費者も増えている。買い取ってもらうことにより、消費者は処理費用を支払わずに済む

上、買取料金を得ることができる。そして、製品は、再利用されることとなるので、環境負荷の低減に役立っている。このように、中古市場の拡大が起きている。

2.3 生産者

生産者は、循環型社会形成推進基本法によると、生産活動を行うことにより、原材料が廃棄物となることを抑制するために必要な措置を講ずるとともに、原材料が再生資源となった場合には、自ら適正に利用を行う、または適正に利用を行うために必要な措置を講じる。そして、適正な利用が行われない資源については、自らの責任において適正に処分しなければならない。また、廃棄物処理法によると、生産者は、処理が困難であるかどうかあらかじめ評価し、処理が困難でない製品等を開発しなければならない。さらに、資源有効利用促進法によると、生産者は、生産活動において原材料の使用に対する合理化を行い、再生品の使用に努めなければならない。生産段階での再使用部品の使用と、設計段階での再使用を配慮を考慮した製品設計を義務づけているのは、世界で初めてである [32]。そして、各リサイクル法によると、生産者は、自ら生産して製品を回収し、再商品化と行わなければならない。また、設計段階での省資源化、長寿命化を行い、環境を考慮した製品を生産しなければならないとある。グリーン購入法では、製品を購入するときに、環境を考慮した製品を選択するように努めなければならないとある。

このように、設計の段階から環境を考慮した製品を生産していくためには、生産段階での廃棄物の発生抑制、再使用部品の使用などを行っていかなければならない。また、使用済の製品を回収して、再商品化することは、拡大生産者責任の考え方を取り入れており、生産者の責任として、自主回収とその再商品化を義務づけている。経済協力開発機構 (OECD) では、1994 年から拡大生産者責任の検討を開始し、2001 年にガイダンス・マニュアルが公開されている。各国の拡大生産者責任制度として、例えば、カナダではオイルおよびその容器・フィルタ、ペンキ、廃タイヤが強制的な引取り措置になっており、イギリスでは容器包装材が強制的な引取り措置となっている [11]。また、自らの製品を、再商品化をしていくので、設計の段階で再商品化をしやすくする設計等の必要性が出てくる。生産者は、さまざまな取組みを行っているが、市場における製品の短寿命化、製品品種の多様化などにより、多くの問題を抱えている。

3 循環型社会に向けた製造業の取組み

ここでは、製造業において循環型社会に向けて行われている取組みについて述べる。多くの企業が循環型の生産システムの構築に取り組んでいるが、代表的な事例として、富士写真フイルム株式会社のレンズ付きフイルムの循環生産システムがある。これは、資源消費の抑制と環境負荷の低減を実現する生産システムの先駆的事例として注目されている [19]。

3.1 インバース・マニュファクチュアリング

製造業は、大量生産のために生産効率の向上を目標に製品の作りやすさを追求してきた。しかし、循環型社会の形成が進むことにより、製造業は、回収されてくる製品をリサイクルするために、

3.3 家電リサイクルにおける取組み

上述のように、多くの製造業者が、自社内で製品の流れをクローズド・ループ化し、再生産を行っているが、家電製品は2つのグループにわかれることによって製品のリサイクルを行っている。

回収された家電製品は、A グループ (松下電器産業株式会社, 株式会社 東芝) の製品と、B グループ (株式会社 日立製作所, 三菱電気株式会社, 三洋電機株式会社, シャープ株式会社, ソニー株式会社) の製品に分けられ、それぞれのグループのリサイクルセンタでリサイクルが行われる。このリサイクルセンタでは、回収されてきた製品を分解し、適切な処理を行って再生産に用い、再生産に用いることができない製品は、粉碎などにより廃棄物処理を行っている。そして、粉碎などにより処理された製品は、再生資源として流通していくこととなる。この方法では、再生資源の受入れ先がなければならなくなり、クローズド・ループ化させていない。それぞれの製造業者は、設計の段階から共通化を図るなどを行うことにより、いかに廃棄物を処理するかではなく、製品をリユースやクローズド・ループシステムによるリサイクルによって、環境への負荷を低減させる製品作りを行っていかなければならないと考えられる。

3.4 循環型社会への課題

循環を行っていくためには、販売した製品を回収する必要がある。レンズ付きフィルムのように顧客が自ら回収を行わざるを得ない場合を除き、製造者がコストをかけて回収を行っていかなければならない。また、回収した製品をリサイクルするためにもコストがかかってくる。そして、コストがどれだけかかるのか、そのコストをどのように負担するのかといった問題がある。リサイクルコストの徴収にしても家電 (エアコン, テレビ, 冷蔵庫, 洗濯機) のように廃棄する段階で徴収するものや、デポジット制のもの、パーソナルコンピュータや自動車のように消費する段階で徴収するものがある。デポジット制は、日本ではソフトドリンク缶等に、一部の地域でしか導入されていないが、ドイツでは、使い捨て飲料容器、洗剤容器、乳状塗料容器に導入されている [11]。木全 [13] は、開発と廃棄に焦点をあて、自動車リサイクルの現状と今後の課題を検討している。ここでは、リサイクルにかかるコスト負担をどの段階で行うかなどの課題をあげている。

また、製品の再生産を行っていく上で、回収されてくる製品が生産を行うときの資源となってくるため、製品の回収予測が重要となってくる [3]。さらに、その回収されてきた製品の品質も重要となってくる。それらの予測を行うことによって、再生産できる製品量がわかり生産計画を立てていくことができる。

4 在庫管理

4.1 従来の在庫管理方式

在庫管理に関する研究として、まず発注点方式が挙げられる。これは、在庫量が発注点とよばれる一定の在庫水準にまで下がってきたら一定量の発注を行うことによって在庫を管理していく方法

である。この方法では、発注量は一定であるが、発注時期などにばらつきが生じる。一方、発注時期を一定にして発注を行う定期発注方式がある。これは、あらかじめ決められた1週間ごとや1日ごとなど一定の発注間隔で発注を行う。したがって、この方法では、発注時期が一定となり、発注量がばらつくため、発注点方式の特徴とは逆になる。定期発注方式において、環境変化に対応するために発注間隔を短縮すると、発注回数が増加することとなり管理の手間が増えるといった問題点が挙げられる。そして、その中間的な管理法として、 (s, S) 在庫方式がある。この方法は、在庫が一定の水準 s 以下にまで減少したら在庫水準 S まで発注を行う。この方式では、発注の時点は発注点方式と同様であるが、発注量は一定量ではなく変動することとなる [15]。

上記、従来型の在庫管理においては、製品劣化や製品寿命等が考慮されていない。

4.2 製品寿命を考慮した在庫管理

製品の品質や寿命を考慮することにより、環境に応じたより効果的な在庫管理を行うことが可能となる。製品寿命を考慮した在庫管理モデルは、まず1期間の製品寿命 [2] を持った多段階劣化の在庫管理が考えられ、ついで2期間 [39]、 m 期間 [5] へと拡張されている。とくに、Nahmias の m 期間モデル [23] では、廃棄の期待費用が発注政策に関与するようになっている。

しかし、これら在庫管理方式では、製品を販売するまでしか考慮していない。

4.3 調達・販売・物流を考慮した在庫管理

発注量や発注時期を管理するだけでは、複雑化してくる環境に対応していくことができない。そこで、狭義の資材所要量計画のための技法としてMRP(Material Requirements Planning) が考えられた。その後、MRP は、広義の生産システム全体の流れを計画、管理するシステムとなった [25, 16]。そして、MRP システムの考え方や方法を流通の領域までに広げ、顧客の手にわたるまでの流通在庫を管理するDRP(Distribution Requirements Planning)[25, 38] や、生産体における生産にかかわる業務の流れを一体化し、生産の効率化を目的としたCIM(Computer Integrated Manufacturing)[18]、製品のライフサイクルに関する情報を電子化し、必要な情報の共有・再利用を図り、生産性の向上、コストの低減、期間の短縮などを図るCALS(Continuous Acquisition and Life-cycle Support)[9]、生産、流通、販売、顧客までのプロセスを全体的に統合管理するSCM(Supply Chain Management)[37] といった管理方法が考案されてきた。これらは、ムダな在庫をゼロにすることを目的としており、情報とともにモノの管理を行っている。これらの管理の範囲が手持ち在庫、仕掛品在庫、流通在庫、そしてグローバルな在庫としたいに大きくなっていくことにより、在庫管理は難しくなる。そこで、在庫のバラツキを抑えるためにロジスティックを考慮した管理が目ざされているが、それらは生産者から消費者へ製品の流れしか考慮していない。

4.4 循環型社会に対応した在庫管理

これまででは、上述のような工場内在庫のみを考えていればよかった。しかし、製造物責任 (PL 法) や拡大生産者責任といった、顧客が使用中、使用済になった製品に対しても責任を負わなくて

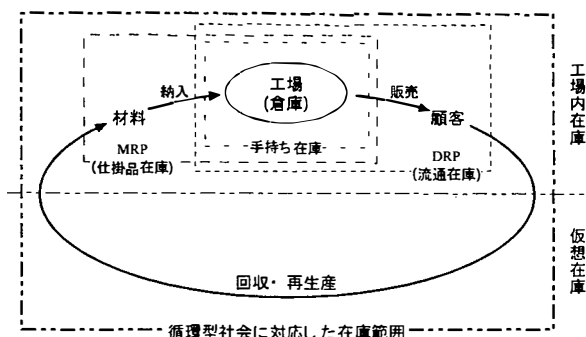


図3 循環型生産システムにおける在庫管理の概念

はならなくなってきた。さらに、環境への負荷を低減させていくために、使用済の製品を回収して、再生産を行なっていかなければならない。このようなことから、循環型社会に適応した在庫管理は、顧客が使用中の製品、使用済になった製品をも管理していかななくてはならなくなる。さらに、これらの製品を回収するとそれぞれ回収された製品ごとに品質が異なってくる。すなわち、いままではモノの管理だけを行っていたが、回収されてくる製品の品質のバラツキによって生産に与えられる影響が大きいため、品質を考慮した管理が要求される。したがって、製品を回収し、再生産を行っていく循環型生産システムにおいては、工場内在庫のみではなく、顧客が使用中の製品も有効在庫として管理する視点が必要である。

従来システムを含めた循環型生産システムにおける新しい在庫モデルの概念を図3に示す。これは、従来手持ち在庫として工場の中にある在庫を管理してきた。そして、MRPの登場により発注した資源が納入されてくるまでを管理の対象に入れた。さらに、DRPにより顧客に販売されるまでの流通している段階で発生する流通在庫をも管理の対象としてきた。そして、これらの在庫量をゼロに近づけることを目標としてきた。

循環型生産システムの在庫管理の概念では、これらの対象に加え顧客に販売後の顧客が使用中の製品を仮想の在庫(以下、仮想在庫)として扱い、回収、再生産されるまでのすべての段階においての製品を有効在庫として管理していく。そして、仮想在庫が多くなればなるほど、その製品が市場におけるシェアが大きいこととなる。従来、顧客に対するアフターサービスの一貫として仮想在庫が扱われてきた。そして、製品の回収が行われるようになると、前述した富士写真フイルム株式会社や株式会社リコー等のように、仮想在庫は再生産に活用されるようになった。さらに、循環型社会が進むと回収されてくる製品の寿命等が重要となり、仮想在庫は活用だけではなく管理も行われていくこととなる。このような変化とともに、仮想在庫の管理を行っていく循環型生産システムを次節で述べる。

5 循環型生産システム

5.1 従来の研究

Minner[21]は、循環型生産システムの管理に関する研究の流れを、SIC(Stochastic Inventory Control)とMRP(Material Requirements Planning)の2分野に分けている。そして、本研究はSIC分野に焦点を当てており、その分野における従来の研究として、需要変動等の確率変動を考慮した在庫管理モデルが、これまでいくつか提案されてきた。定期観測モデルとして、Cohenら[4]は、回収された製品を直接再利用するモデルを提案し、総費用を最小にする最大在庫量の決定方法を示している。しかしながら、繰り越し需要は考慮されていない。さらに、Inderfurth[8]は、発注と再生産におけるリードタイムの影響について議論している。連続観測モデルとしては、MuckstadtとIsaac[22]が、 (s, Q) ルールに基づくリードタイムとシステムの制御政策を考慮したモデルを提案し、van der LaanとSalomon[20]は、新品と再生産部品を用いた生産と在庫を結びつけるPUSH and PULL戦略を提案している。しかし、これらの研究においては、販売されて顧客が使用中の製品は管理の対象にされてこなかった。また、Nakashima et al.[26]は、マルコフモデルを用いて1段階のみの製品ライフサイクルを考慮したシステムの分析を行っている。

5.2 循環型生産システム

ここでは、循環型社会に適応した循環型生産システムについて述べる。

循環型生産システムとは、従来、在庫管理で考えられていた“生産-販売”といった在庫の概念を拡張し、“生産-販売-使用-回収-再生産”といった顧客が使用している製品も仮想在庫として捉えたものである。

従来型の生産システムでは、図4のように資源と大量に消費することによって大量生産を行い、それを販売してきた。そして、大量に生産された製品は、顧客が使用した後、使用済になると大量



図4 従来型の生産システム

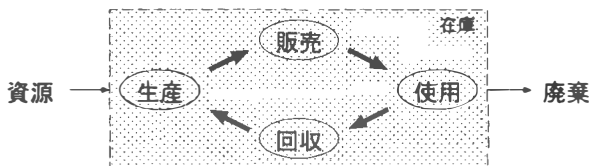


図5 循環型生産システム

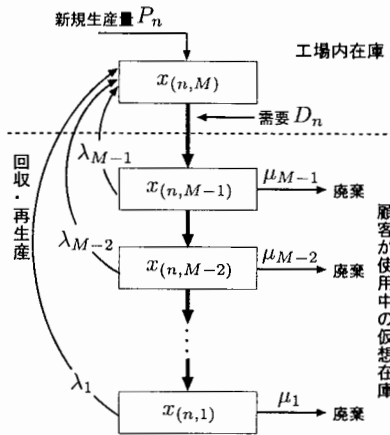


図6 循環型生産システム

に廃棄されることとなった。そして、生産者は、製品の在庫が顧客の手にわたるまでの生産・販売のみを管理してきた [28, 29],

一方、循環型生産システムでは、図5のように顧客が使用した製品を回収して再生産に用いている。そのため、生産者は製品が顧客の手にわたった後も在庫として捉え、生産、販売、使用、回収、そして、再生産にいたるまでの全段階においてそれらの製品を有効在庫として、管理していくこととなる。

このような循環型生産システムを考えていくうえで、前述した閉ループであることが重要となる。閉ループであることにより、生産した製品が外部にいくことなく閉じられた範囲で回収、再生産が行えることが重要となるからである。ここでは、コメントサークル(図2)の製品、部品の再使用を対象と考えていく。なお、リサイクルを化学処理等により原材料の再利用を行うものと考え、再生産は組立製品の分解、分解製品の修理、検査、再利用生産を含むものとする [6]。

そして、循環型生産システムを構築していくためには、多階層化したシステムを考える必要があり、Perishable product[24]の考え方を応用する。これにより、工場内在庫と仮想在庫とを差別化して考慮することができる。さらに、仮想在庫を多階層化することにより、顧客が使用中の製品がどの程度使用されたものであるかといった製品寿命による差別化を行うことができる。

5.3 システムの定式化

本モデルでは、需要変動の不確実性や製品が再生産される割合、廃棄割合等の変動を考慮した単一品種を生産する循環型生産システムを考える(図6)。ここで、各期の製品の生産は、新規生産と使用されている製品を回収し、それらの部品を用いる再生産の2種類の方法によって行われる。第 n 期の新規生産量を P_n とし、製品需要量 D_n は、独立で同一な分布に従う確率変数とする。さらに、すべての生産された製品は同一の最大寿命 M をもち、販売されるまで劣化しないものと仮定

する。顧客が使用中の製品は、1 期間ごとに単調に劣化する、もしくは回収されて再生産されるか、廃棄される。そして、回収された製品は、回収された時点の残り寿命に応じた再生産費用を必要とし、回収費用も含むものとする。製品寿命を終えた（残り寿命が零）製品は廃棄され、環境負荷に対するペナルティとして廃棄費用が生じるものとする。また、再生産が不可能となった製品は、再生産されずに廃棄される。その他の費用として、新規生産費用、在庫保管費用、品切れ費用を考慮し、システムの定常状態を仮定したモデルを考える。

第 n 期首における残り寿命が m 期間である製品の在庫量が $x_{(n,m)}$ であることより、第 n 期首におけるシステムの在庫状態は、

$$X_n = (x_{(n,1)}, x_{(n,2)}, \dots, x_{(n,M-1)}, x_{(n,M)}) \quad (1)$$

で表される。図 6 のように、第 n 期における m 番目の階層は、記号 $x_{(n,m)}$ に対応するとし、 m 期間後には残り寿命が零となる製品量を表す。新しい製品は、最も高い階層 M に入り、製品の販売後、下位の階層へと移っていく。そして、階層 $(M-1)$ 以下においては製品のいくつかは、率 $\lambda_m (m=1, \dots, M-1)$ で回収・再生産されて、最も高い階層へと移る。また、階層 $(M-1)$ 以下においては製品のいくつかは、 $\mu_m (m=2, \dots, M-1)$ の割合で廃棄される。なお、最も低い階層 1 になった製品は、 λ_1 の割合で回収・再生産され、率 $(1-\lambda_1)$ で廃棄される。

在庫量の推移として、 $x_{(n+1,M)}$ から $x_{(n+1,1)}$ までの在庫量を以下のように表す。

$x_{(n+1,M)}$ は、工場内の製品在庫量を表す。ここで、品切れが発生している場合には、 $x_{(n+1,M)} < 0$ となる。そして、 $x_{(n+1,M)}$ は、

$$x_{(n+1,M)} = x_{(n,M)} + P_n + \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_m x_{(n,m)} - D_n \quad (2)$$

となる。また、 $x_{(n+1,M-1)}$ の在庫量は、販売された製品量と同じであり、最大在庫量である $[x_{(n,M)}]^+ + P_n + \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_m x_{(n,m)}$ と最大需要である $D_n + [-x_{(n,M)}]^+$ を比較し、小さい方が販売された製品量となるので、

$$x_{(n+1,M-1)} = \min \left([x_{(n,M)}]^+ + P_n + \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_m x_{(n,m)}, D_n + [-x_{(n,M)}]^+ \right) \quad (3)$$

で表される。ただし、 $[y]^+$ は $\max(0, y)$ を表すため、 $x_{(n,M)}$ が同時に発生することはない。つぎに、 $x_{(n+1,M-2)}$ から $x_{(n+1,1)}$ は、顧客が使用中の仮想在庫量となるため、

$$\begin{aligned} x_{(n+1,M-2)} &= (1 - \lambda_{M-1} - \mu_{M-1}) x_{(n,M-1)} \\ &\vdots \\ x_{(n+1,1)} &= (1 - \lambda_2 - \mu_2) x_{(n,2)} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

また、新規生産量 P_{n+1} は、工場内在庫量の最大値を x_{\max} とすると、

$$P_{n+1} = \left[x_{\max} - x_{(n,M)} - \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_m x_{(n,m)} \right]^+ \quad (5)$$

で与える.

このとき, 1 期間当たり総費用 $L(X_n)$ は, 製品 1 個あたり新規生産費用を c , 残り寿命 m である製品 1 個あたり再生産費用を θ_m , 製品 1 個あたり在庫保管費用を h , 製品 1 個あたり品切れ費用を b , 製品 1 個あたり廃棄費用を δ とすると,

$$\begin{aligned}
 L(X_n) = & cP_n + \sum_{m=1}^{M-1} \theta_m \lambda_m x_{(n,m)} \\
 & + h \left[x_{(n,M)} + P_n + \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_m x_{(n,m)} - D_n \right]^+ \\
 & + b \left[D_n - \left(x_{(n,M)} + P_n + \sum_{m=1}^{M-1} \lambda_m x_{(n,m)} \right) \right]^+ \\
 & + \delta \left\{ (1 - \lambda_1) x_{(n,1)} + \sum_{m=2}^{M-1} \mu_m x_{(n,m)} \right\}
 \end{aligned} \quad (6)$$

となる.

5.4 循環型生産システムのシナリオ

循環型生産システムをシナリオに分けてみると図 7 のようになる.

シナリオ 1 は, 循環型社会を考えていない従来型の生産システムである. このシステムは, 生産を行い製品を販売した後そのまま廃棄されていく.

シナリオ 2 は, 現在多く考えられている循環型生産システムである. このシステムは, 製品寿命を $M-1$ から 1 までをひとつの集合として考えており, どのような製品寿命の製品が回収されてきているかわからない.

そして, 製品寿命を考慮することによってシナリオ 3 のようになる. このシステムでは, 製品寿命ごとに回収と廃棄があり, 回収される製品の品質を把握できるシステムとなっている.

シナリオ 4 は, 廃棄されるものがなくなり, 完全なクローズド・ループシステムとなったシステムである.

そして, これらのシナリオを回収率と廃棄率の観点からマトリクスで表すと図 8 となる. たとえ

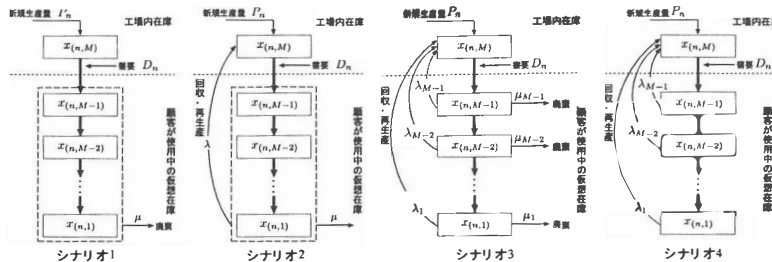


図 7 シナリオに分けた循環型生産システム

<div> <div>回収率</div> <div>廃棄率</div> </div>	$\lambda = 0.0$	$\lambda \neq 0.0$	$\lambda_m \neq 0.0$
$\mu \neq 0.0$	シナリオ 1	シナリオ 2	
$\mu_m = 0.0$			シナリオ 4
$\mu_m \neq 0.0$			シナリオ 3

$m = M - 1, \dots, 1$

図8 マトリクスにおけるシナリオの領域

ば, 富士写真フィルム株式会社等の循環型生産システムは, シナリオ 2 に分類される.

5.5 数値実験

最も一般型であるシナリオ 3 における数値実験を行う. 製品の最大寿命が 3 期間 ($M = 3$) を仮定し, 工場内在庫量の最大値を $x_{\max} = 20$ とする. また, 需要 D_n は平均を 15 で正規分布に従うものとし, 正規分布の発生には, 次式の Box と Muller の方法 [17] を用いる.

$N(a, b^2)$ のとき,

$$D_n = b * (-2 \log u_1)^{1/2} \cos(2\pi u_2) + a. \quad (7)$$

ここで, u_1, u_2 は一様乱数である.

各実験では, まず 1000 期間のシミュレーションを行い, 各期の総費用を算出することにより, 平均費用を求める. さらに, 同じ実験を 10 回行い, その平均値を 1 回のシミュレーションの実験結果とする.

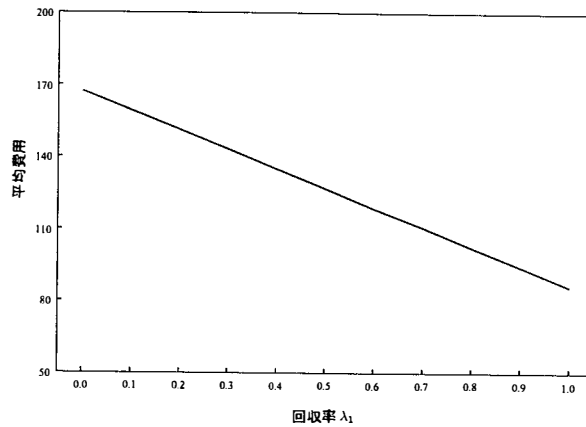
まず, 新規生産費用を $c = 3$, 保管費用を $h = 1$, 品切費用を $b = 10$, 残り寿命が 2 のときの再生産費用を $\theta_2 = 2$, 残り寿命が 1 のときの再生産費用を $\theta_1 = 4$, 廃棄費用を $\delta = 10$ とする. そして, 回収率が $\lambda_2 = 0.2$, 廃棄率が $\mu_2 = 0.2$ のときの回収率 λ_1 の変化を図 9 に示す.

図 9 より, 回収率 λ_1 が増加すると平均費用が減少している. これは, 回収率が増加することにより, 廃棄される在庫量が減少するためである. これは, 循環が促進される環境においては平均費用が減少していくことを示している.

回収率や廃棄率を変化させることにより, 循環型生産システムのシナリオに対応した平均費用を求めることが可能であり, 本システムの有効性が示されている.

6 結 言

本研究では, 循環型社会に適応した生産システムである循環型生産システムについて述べた. そして, 廃棄物処理や地球環境問題等について述べ, 日本における循環型社会に向けた法的取組みに

図9 回収率 λ_1 の変化による平均費用の変化

ついて概説した。また、製造業で行われている取組みを紹介した。さらに、循環型生産システムを構築していく上で、考慮しなければならない在庫管理の概念の拡張、製品寿命の管理等を述べた。これらにより、顧客が使用中の製品を仮想在庫として捉える循環型生産システムの有用性について議論した。

参考文献

- [1] 浅野直人: “循環型社会と法制度”, 都市問題研究, Vol.54, No.9, pp.39-50 (2002)
- [2] Blinskaya, E.V.: “Some results optimum inventory policies”, *Theory of Probability and its Applications*, Vol.9, pp.389-403 (1964)
- [3] 千代倉光宏, 相原康宏: “レンズ付きフィルムの循環生産システム”, 日本経営工学会経営システム誌, Vol.9, No.4, pp.184-188 (1999)
- [4] Cohen, M.A., Pierskalla, W.P. and Nahmias, S.: “A dynamic inventory system with recycling”, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.27, pp.289-296 (1980)
- [5] Fries, B.: “Optimal ordering policy for a perishable commodity with fixed life-time”, *Operational Research*, Vol.23, pp.46-61 (1975)
- [6] Gungor, A. and Gupta, S.M.: “Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey”, *Computer & Industrial Engineering*, Vol.36, pp.811-853 (1999)
- [7] Hentschel, C.: “The greening of products and production - A new challenge for engineer”, *In: Pappas IA Tatsiopoulou IP editors, Advances in production management systems B-13 Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers*, pp.39-46 (1993)
- [8] Inderfurth, K.: “Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with lead-times”, *OR Spektrum*, Vol.19, pp.111-122 (1997)
- [9] 石黒憲彦, 奥田耕士: 「CALS: 米国情報ネットワークの脅威」, 日刊工業新聞社 (1995)
- [10] 環境省: 「平成 14 年度 環境白書」, ぎょうせい (2002)
- [11] 環境省: 「平成 14 年度 循環型社会白書」, ぎょうせい (2002)
- [12] 経済産業省: <http://www.meti.go.jp/>
- [13] 木全晃: “自動車リサイクルにおける現状と課題”, 日本経営工学会経営システム誌, Vol.9, No.4, pp.193-197 (1999)
- [14] 木村文彦: “作りやすさと壊しやすさ”, 日本機械学会誌, Vol.101, No.954, pp.349-350 (1998)
- [15] 児玉正憲: “生産・在庫管理システムの基礎”, 九州大学出版会 (1996)
- [16] 栗山仙之助, 能勢豊一: “MRP における OA とコミュニケーション”, オフィス・オートメーション学会誌, Vol.4, No.4, pp.103-107 (1983)
- [17] 近藤次郎: 「応用確率論」, 日科技連出版社 (1985)
- [18] 栗山仙之助: 「総合経営情報システム研究-SIS と CIM による経営自動化へ」, 日本経営協会総合研究所 (1995)
- [19] 栗山隆之: “「写ルンです」循環生産システムの開発”, 品質, Vol.31, No.3, pp.22-29 (2001)
- [20] van der Laan, E.A. and Salomon, M.: “Production planning and inventory control with re-manufacturing and disposal”, *European Journal of Operational Research*, Vol.102, pp.264-278 (1997)
- [21] Minner, S.: “Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains”, *International Journal of Production Economics*, Vol.71, pp.417-428 (2001)

- [22] Muckstadt, J.A. and Isaac, M.H.: “An analysis of single item inventory systems with returns”, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.28, pp.237-254 (1981)
- [23] Nahmias, S.: “Optimal ordering policies for perishable inventory”, *Operational Research*, Vol.23, pp.735-749 (1975)
- [24] Nahmias, S.: “Optimal and approximate ordering policies for a perishable product subject to stochastic demand”, *Ph.D.Dissertation, Northwestern University*, pp.10-23 (1972)
- [25] 中根甚一郎:「統合化 MRP システム-設計と導入-」, 日刊工業新聞社 (1984)
- [26] Nakashima, K., Arimitsu, H., Nose, T. and Kuriyama, S.: “Analysis of a product recovery system”, *International Journal of Production Research*, Vol.40, No.15, pp.3849-3856 (2002)
- [27] Nasr, N.: “Environmentally conscious manufacturing”, *In: Careers and Engineer*, pp.26-27 (1997)
- [28] Nose, T., Ishii, H. and Nishida, T.: “Some Properties of Perishable Inventory Control Subject to Stochastic Leadtime”, *Journal of Operational Research Society Japan*, Vol.24, No.2, pp.110-135 (1981)
- [29] 能勢豊一, 栗山仙之助: “物流環境の不確実性を考慮した生鮮食品発注・在庫方策に関する研究”, 日本経営工学会誌, Vol.43, No.4, pp.276-280 (1992)
- [30] 鈴木幸毅: 「循環型社会の企業経営」, 税務経理協会, pp.193-196 (2000)
- [31] 谷達雄: “リサイクルしやすい設計の事例”, 日本機械学会誌, Vol.101, No.954, pp.371-376 (1998)
- [32] 田辺靖雄: “よくわかる改正リサイクル法 1”, 日経エコロジー, Vol.12, pp.58-60 (2001)
- [33] 梅田靖: “循環型生産システム実現のための課題”, 日本インダストリアル・エンジニアリング協会 IE レビュー 42, pp. 6-12 (2001)
- [34] Wann, D.: “Deep design: pathways to a livable future”, *Washington: Island Press* (1996)
- [35] 渡辺富夫, 佐藤文: “限りなく廃棄ゼロをめざして”, 日本インダストリアル・エンジニアリング協会 IE レビュー 219, Vol.42, No.1, pp.15-19 (2001)
- [36] Wenzel, H., Hauschild, M.Z. and Alting, L.: “Environmental Assessment of Products, Vol.1”, Chapman & Hall (1997)
- [37] 山下洋史, 諸上茂登, 村田潔: 「グローバル SCM: サプライチェーン・マネジメントの新しい潮流」, 有斐閣 (2003)
- [38] 吉谷龍一: 「無在庫流通システム-MRP から DRP へ」, 日刊工業新聞社 (1983)
- [39] van Zyl, G.J.J.: “Inventory control for perichable commodities”, *PH.D. Dissertation*, University of North Carolina (1964)